

## Ball End Mill 가공시 가공특성에 관한 연구

### A Study on in Ball End Mill Cutting Operation the Cutting characteristics

오영생(광주기능대학), 박창언(목포대학교), 김일수(목포대학교), 정영재(목포대학교 대학원),  
손준식(목포대학교 대학원), 김인주(목포대학교 대학원)

Oh Young Saeng(Kwang-Ju Poly-technic College), Kim Ill-Soo(Mokpo National Univ.),  
Pack Chang-Eun(Mokpo National Univ.), Jeong Young-Jae(Graduate School, Mokpo National Univ.),  
Son Joon-sik(Graduate School, Mokpo National Univ.),  
Kim In Ju(Graduate School, Mokpo National Univ.)

#### Abstract

The biggest challenge facing today's manufacturing industry is better quality and high productivity. From an economic point of view, productivity is the most important parameter, as high productivity will reduce the cost. However, the customers of today are not only cost concerned, but also quality conscious. So high accuracy levels should also be achieved in the manufacturing process. The aim of this paper is to get a comprehensive understanding of its machinability properties and to investigate the relationship between cutting conditions and surface roughness for Ball End Mill cutting process so as to enhance its practical application.

#### 1. 서 론

산업사회의 발달과 수치제어(numerical control) 해석이 CAD/CAM의 이용으로 자유곡면 해석이 용이함에 따라 각종 항공기, 자동차, 가전제품 및 일상 생활용품등 모든분야에서 금형을 이용한 대량생산 체계가 일반화되고 있다<sup>1)</sup>. 몰드금형을 가

공하는 절삭공구인 볼엔드밀(ball end mill)은 곡면 부분을 가공시 주로 2차가공이나 최종 다듬질작업을 하는데 많이 사용되고 있으며, 사용빈도가 점차 높아지는 현실을 감안할 때 볼엔드밀 가공 조건에서 최적의 절삭조건을 예측은 상당히 중요한 일이다. 일반적으로 절삭조건을 선정하는데는 2차원 절삭이나 3차원 절삭의 이론적인 방법을 적용하기에는 볼엔드밀의 가공특성상 많은 제약이 따른다. 또한, 볼엔드밀로 자유곡면을 가공하는데는 시간이 매우 길게 걸리며, 사용커터의 선택도 가공면 최소 필렛(fillet)의 곡률반경값을 초과할 수 없으며, 볼엔드밀의 곡면 정점부에는 절삭속도가 없는 상태이므로 정상적인 절삭이 이루어질 수 없어, 공구파손의 우려가 높으며, 곡면경사각 변화, 절삭폭, 절삭깊이 등이 변화함에 따라 절삭되는 각 부위에서의 절삭속도, 절삭저항력이 다르게 나타나며, 가공경로가 변화함에 따라 절삭상태가 연속적 변화가 일어나므로 자유곡면을 가공하는 볼엔드밀 가공상의 절삭역학에 관한 해석

이 매우 복잡한 기하학적 특성을 갖고 있어, 이 분야의 연구가 미진한 현실이다.

Kishinami<sup>2-4)</sup>은 곡면 필렛형상에 따라 절삭날을 선택하고 절삭특성을 고려한 절삭작용각에 관하여 해석하였으며, Miyazawa<sup>5)</sup>은 자유곡면 가공을 하였을 때 가공면의 표면거칠기에 관한 연구 및 곡면가공시 절삭력계의 변화특성에 관한 연구를 수행하였다. Kline<sup>6)</sup>등은 실험적 방법을 이용하여 볼엔드밀의 절삭력해석의 모델을 제시하였으며, 컴퓨터를 이용하여 절삭력의 특성을 분석하였다. Usui<sup>7)</sup>, Ernst<sup>8)</sup>의 연구에서는 실험데이터(experiment data)와 일반적인 절삭성을 고려한 단순한 모델을 설정하여 최적의 절삭조건들을 제시하였으며, 절삭상수와 절삭작용 누적계수들의 선형방정식(linear equation)표현으로 절삭력계를 계산하고 토크, 주변력, 동력 등을 예측하였다.

일반적으로 절삭가공에 의한 다듬질면의 거칠기(粗度)는 측정방향에 따라 2가지로 나타낼 수 있다. 공작물의 회전방향과 공구의 이송으로 인한 미세한 나선모양을 하고 있으므로 측정하는 방향에 따라 표면거칠기는 달리 나타난다. 절삭방향의 표면거칠기는 주로 공구의 절삭성에 따라 영향을 받게 되고, 이송방향의 표면거칠기는 공구 날끝의 노즈반경(nose radius)과 이송속도에 의해 대략 기하학적으로 결정된다. 일반적으로 선삭의 경우나 정면밀링(face milling)가공에서는 이송방향의 조도가 큰 값을 나타내므로 이를 측정하여 표면거칠기로 나타낸다. 그러나 볼엔드밀의 경우는 공구의 직경, 이송, 이송방향과 직각방향의 픽피드(pickfeed)에 따라서 이송방향과 픽피드방향의 표면거칠기는 달라지므로 이에 관한 추가적인 연구가 필요로 한다.

본 연구에서는 현장에서 금형의 자유곡면 모델

링하여 볼엔드밀을 사용하여 가공하였을 때 곡면의 경사정도에 따라 변화하는 표면거칠기의 관계를 고찰하기위해 절삭깊이, pickfeed량, 이송속도 등 절삭 조건의 변화에 따라 나타나는 가공상의 특성을 분석하기 위하여 실험 모델을 이송방향의 각도를  $-45^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ 로 하고, 절삭속도는 40m/min, 볼엔드밀은  $\varnothing 12\text{mm}$ 로 선정하여 최적의 절삭조건을 얻고 곡면가공에 요구되는 표면거칠기와 정밀도를 얻기위한 최적의 가공 조건을 제시하고자 한다.

## 2. 실험방법

표면거칠기 실험은 각각의 절삭조건에 따라서 절삭력을 측정된 후 그 시험편을 사용하여 측정실 조건이 항상 일정한 측정실에서 실험을 실시하였다. 표면거칠기 측정기의 측정대(leveling stand)위에 시험편을 설치하여 다이알게이지(dial indicator)로 수평을 잡고 표면거칠기의 촉침(stylus tip)으로 중심선평균거칠기( $R_a$ )와 최대높이거칠기( $R_{max}$ )를 측정할 수 있도록 초기 조건을 선정하였다. 컷오프(cut off)값은 0.8mm, 측정길이(traversing length)를 4.0mm로 측정요소를 3개부분 측정하였으며, 측정값은 analyzer에 수치로 나타낼 수 있게 하였으며, 변위량에 비례하는 전압은 증폭기(amplifier)에서 증폭시킨 후 A/D converter를 통하여 디지털 기록기(digital recorder)에 직접 기록하도록 하여 평균치 값을 취하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1. 최대높이 거칠기( $R_{max}$ )

실험디자인에 의한 절삭가공을 하여 가공된 시편의 표면거칠기를 표면거칠기 측정기(surface roughness tester)로 측정하여 얻어진 최대높이거칠기( $R_{max}$ )와 중심선평균거칠기( $R_a$ )를 절삭조건에 따라 가공면의 표면거칠기 변화 관계를 Figs. 1 ~ 4에 나타냈다. Feed direction의 경사각을  $-45^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  인 조건에서 절삭조건이 변화에 따라서 경사면의 조도가 거시적으로 일정한 변화를 보이고 있음을 알 수 있다. 즉 경사도가 없는  $0^\circ$  일 때는 표면거칠기가 적은 값이 나타나고,  $45^\circ$  방향으로 상방향(upward) 절삭일 때와  $-45^\circ$  로 하방향(downward) 절삭 일때는 거의 같은 경향이나 상방향절삭을 할 때가 양호한 조도를 나타냈다. 절삭저항값이 크게 나타나는 경우에 표면조도가 거칠게 나타나는 것이 일반적인 경향이며 본 실험의 결과에 의하면 Figs. 1 ~ 4에서와 같이 표면거칠기는 가장 높게 나타났다. 동일 조건에서 가공면의 기울기가 커질수록 절삭합력이 증가하고 표면 형상오차에 영향을 크게 주는 것으로 나타났으며,  $15^\circ$ ,  $165^\circ$  부근 및  $90^\circ$  가까운 부근에서 과소절삭이 일어나며,  $45^\circ$  및  $135^\circ$  정도의 경사면에서 과대절삭이 일어나며, 상방향절삭이 하방향 절삭시 보다 그 형상오차가 적게 나타난다고 주장하였다<sup>9)</sup>. 본 실험에서 Figs. 1 ~ 4와 같이 경사면 절삭을 할 때 표면거칠기가 불량하게 나타났다. 왜냐하면, 절삭깊이가 크고 이송속도가 빠르게 되어 절삭저항이 크게 작용할 때 경사면과 평면절삭시의 표면거칠기의 변화차이는 크게 나타났다. 이와 같은 현상은 경사면 제어를 하는

머시닝센터의 NC제어 시스템과 공구의 강성에 의한 영향에 기인하는 것으로 생각된다.

#### 3.2 중심선평균거칠기

Feed direction 이  $-45^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  에서 다른 절삭 조건들을 변화시켰을 때 나타나는 중심선평균거칠기를 Figs. 5 ~ 8로 나타냈다. Pickfeed direction이  $0^\circ$  일 때 표면거칠기는 적게 나타나고,  $-45^\circ$ ,  $45^\circ$  경사면을 절삭할 경우에 절삭저항은 낮아지는 경향을 보이고 있으나 중심선평균거칠기는 불량하게 나타나는 현상을 보이고 있다. Fig. 5와 같이 feed direction은  $0^\circ$  인 경우가 가장 양호한 표면거칠기를 나타냈으며, Fig. 6에 절삭깊이가 3mm로 절삭할 때 feed direction이 각도가 변화함에 따라 급격히 변화하는 것을 알 수 있다. 그리고 Fig. 8과 같이 이송속도의 변화가 표면거칠기에 미치는 영향은 다른 절삭조건에 비하여 가장 높게 나타나고 있다. Figs. 5 ~ 8에서 표면거칠기의 변화는 절삭저항과 항상 비례적으로 변화하는 종속관계는 아니며, 이송속도, 절삭깊이, pickfeed, 절삭속도등 절삭조건에 의한 절삭저항과 표면거칠기의 관계는 비례적으로 변화하는 경향이거나, feed direction, pickfeed direction, 볼엔드밀 직경의 변화에는 일정한 변화를 보이지 않고 있다. 한홍삼<sup>9)</sup>등에 의하면 볼엔드밀이 지나간 흔적(cusp)에 남게되는 가공오차는 골간의 간격(pickfeed)을 아무리 줄여도 이론적으로 cusp가 남게 되므로 사상작업으로 이를 제거하거나 골간의 간격을 1/2배로 줄이면 cusp의 높이를 약 1/4로 줄일 수 있으나 가공시간이 2배로 증가한다. 직경이 큰 볼엔드밀을 사용하여 cusp높이를 줄일 수 있으나 곡면부 곡률반경이 작은 경우에 공구

간섭이 발생하여 완성이 불가능해지는 문제점이 있다. 그러므로 가공상태에 따라서 공구선택과 가공조건을 선택함으로써 제품의 정도와 가공시간을 고려한 계획이 요구된다.

볼엔드밀 절삭가공을 할 경우에 절삭저항과 표면거칠기의 관계들을 수학적으로 획일화하여 해석하는데는 많은 문제점이 있다고 하였다<sup>10)</sup>.

표면거칠기를 절삭변수에 따라 수학적으로 분석하는 것은 절삭에 영향을 미치는 확정인자에 의한 변화가 나타나는 것으로 해석하게 되는데 실경사면 가공은 실험에서 나타났듯이 이론적인 해석에 오차가 많이 되는 것은 불확정 인자에 의한 영향을 크게 받고 있으며 표면거칠기에 크게 좌우되는 것으로 판단된다.

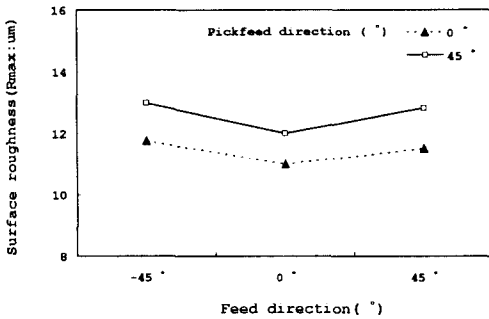


Fig. 1 Variation of surface roughness( $R_{max}$ ) on feed direction and pickfeed direction

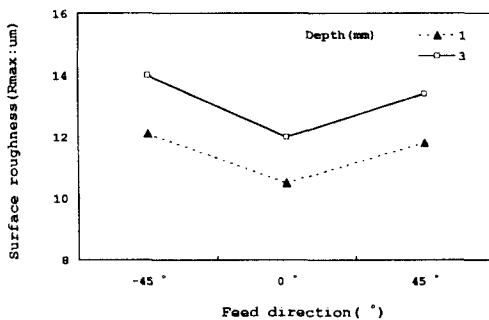


Fig. 2 Variation of surface roughness( $R_{max}$ ) on feed direction and depth

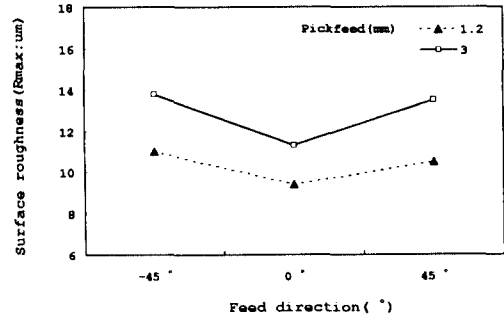


Fig. 3 Variation of surface roughness( $R_{max}$ ) on feed direction and pickfeed

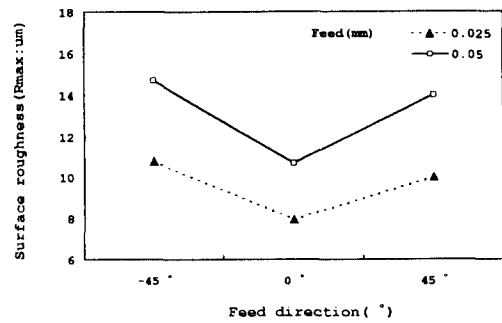


Fig. 4 Variation of surface roughness( $R_{max}$ ) on feed direction and feed

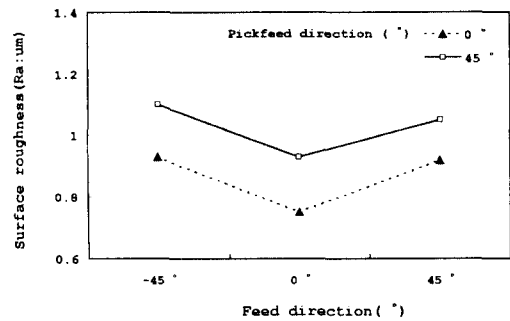


Fig. 5 Variation of surface roughness( $R_a$ ) on feed direction and pickfeed direction

## 5. 결 론

볼엔드밀을 사용하여 곡면가공시 절삭조건에 따른 표면거칠기의 관계 연구와 자동화 및 제어에 필요한 알고리즘을 개발하기 위하여, 시편을 45° 경사면으로 제작하여 실험을 실시하고, 측정된 실험값과 실험식에 의한 예측값을 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 표면거칠기는 경사도가 작을수록 양호하게 나타나며, 평균 칩두께가 커질수록 공구가 불안정 상태로 변하여 경사면의 조도는 떨어진다.
2. 픽피드방향의 표면거칠기는 픽피드량과 볼엔드밀의 직경에 따라 변화하는 값이며, 픽피드량을 미소량으로 했을 때 표면조도는 양호하게 나타나지만 feed mark가 남는 사실을 발견할 수 있었다. 따라서 이 분야의 연구는 지속되어 볼엔드밀 가공으로 최종작업이 이루어질 수 있도록 지속적인 연구가 요구된다.
3. 볼엔드밀에서 표면거칠기는 절삭조건에 의한 확정인자의 영향보다는 외적인 불확정인자에 의한 변화가 크게 나타남을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

1. Chou, B. K. "CAD/CAM Technology for the NC Machining of the Die Cavities", Vol. 2, KIST, 1987.
2. Kishinami, T. et al., "A Theoretical Analysis of Cutting Speed Components on the Rake Face of Circular Ball End Mil", 1, J. of JSPE, Vol. 46, pp. 115-122, 1980.

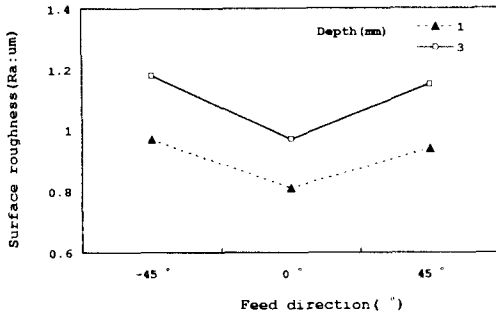


Fig. 6 Variation of surface roughness( $R_a$ ) on feed direction and depth

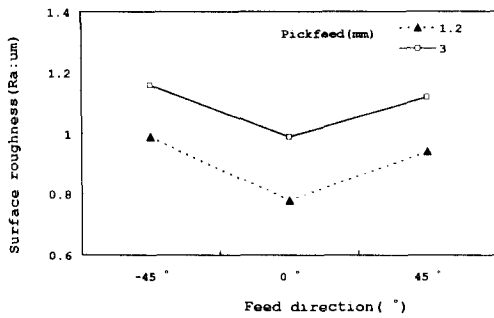


Fig. 7 Variation of surface roughness( $R_a$ ) on feed direction and pickfeed

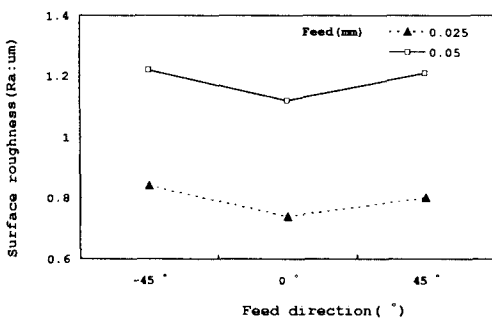


Fig. 8 Variation of surface roughness( $R_a$ ) on feed direction and feed

3. Kishinami, T. et al., "A Theoretical of Cutting Ability of Cutting Operation Angle of Circular Cutting Edge Ball Mill", I. J. of JSPE, Vol. 47, pp. 73-79, 1981.
4. Kishinami, T. et al., "On Relationship between Cutting Ability and Cutting Edge Shape of Circular Cutting Edge Ball End Mill", I. J. of JSPE, Vol. 48, No. 7, pp. 68-74, 1982.
5. Miyazawa, S. and Tankeda, K., "Micro Milling of Three Dimensional Surface", J. of JSPE, Vol. 47, pp. 94-99, 1981.
6. Kline, W.A., Devor, R.E. and Lindberg, J.R., "Prediction of Cutting Forces in End Milling with Application to Cornering Cuts", Int. J. of MTDR, Vol. 22, No.1, pp. 7-22, 1982.
7. Usui. E and Hirota. A, "Analytical Prediction of Three Dimensional Cutting Process. Part 2: Chip Formation and Cutting Forces with Conventional Single-point Too" Journal of Engineering for Industry, Vol. 100, No. pp. 229-234, 1978.
8. Ernst. M, "Metal Cutting", Butterworth. pp. 54-80, 1977
9. 한홍삼. 이동주, "CNC밀링에 의한 볼록곡면가 공시의 가공특성에 관한 연구", 한국정밀공학회지, 제12권 제11호, pp. 45-51, 1995.
10. 양민호, "볼엔드밀 가공시 절삭력 해석모델에 관한 연구", 한국해양대학교 대학원. 석사학위논문, 1996.